

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/001948

International filing date: 24 February 2005 (24.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 10 2004 010 569.3  
Filing date: 26 February 2004 (26.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 30 May 2005 (30.05.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 10 2004 010 569.3  
**Anmeldetag:** 26. Februar 2004  
**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE  
**Bezeichnung:** Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-  
Projektionsbelichtungsanlage  
**IPC:** G 03 F 7/20

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 17. März 2005  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

**Wallner**



Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG  
Carl-Zeiss-Strasse 22  
73447 Oberkochen

Unser Zeichen: P 42685 DE

25. Februar 2004 Mu/SR

Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-  
Projektionsbelichtungsanlage

5 Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer zugeordneten Lichtquelle, ein Verfahren zur Herstellung eines Polarisationskompensators zum Einbringen in ein Beleuchtungssystem sowie eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv.

10 Die Leistungsfähigkeit von Projektionsbelichtungsanlagen für die mikrolithographische Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen wird wesentlich durch die Abbildungseigenschaften der Projektionsobjektive bestimmt. Darüber hinaus werden die Bildqualität und der mit der Anlage erzielbare Wafer-Durchsatz wesentlich durch Eigenschaften des dem Projektionsobjektiv vorgeschalteten Beleuchtungssystems beeinflusst. Dieses muss in der Lage sein, das Licht  
20 einer primären Lichtquelle, beispielsweise eines Lasers, mit möglichst hohem Wirkungsgrad zu präparieren und dabei in einem Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems eine möglichst gleichmäßige Intensitäts-

P 42685 DE

- 2 -

verteilung zu erzeugen. Zudem soll es möglich sein, am Beleuchtungssystem verschiedene Beleuchtungsmodi (Settings) einzustellen, beispielsweise konventionelle Beleuchtung mit unterschiedlichen Kohärenzgraden oder Ringfeldbeleuchtung oder polare Beleuchtung zur Erzeugung einer außersaxialen, schiefen Beleuchtung.

10 In Beleuchtungssystemen für Projektionsbelichtungsanlagen können optische Elemente vorgesehen sein, die eine polarisationsverändernde Wirkung auf das von der zugeordneten Lichtquelle eingestrahlte Beleuchtungslicht ausüben. Eine solche Polarisationsveränderung kann erwünscht sein, beispielsweise wenn ein dem Beleuchtungssystem nachfolgendes Projektionsobjektiv mit Licht einer bestimmten Polarisationsrichtung betrieben werden soll, sie kann aber auch unerwünscht sein. Im letzteren Fall können Elemente in das Beleuchtungssystem eingebracht werden, die zu einer mindestens teilweisen Kompensation der  
15 unerwünschten Polarisationsveränderung führen.

20 In der nicht vorveröffentlichten Patentanmeldung DE 102 11 762 der Anmelderin wird ein optisches System mit einem ersten und einem zweiten optischen Teilsystem mit jeweils mindestens einem doppelbrechenden Element beschrieben. Zwischen dem ersten und dem zweiten optischen Teilsystem ist ein optisches Verzögerungssystem mit einem eine Verzögerung um eine halbe Wellenlänge zwischen zwei zueinander orthogonalen Polarisationszuständen einführenden optischen Verzögerungselement angebracht. Das optische Verzögerungselement dient zur  
25 Kompensation einer durch die doppelbrechenden Elemente des optischen Systems eingeführten, polarisationsverändernden Wirkung. Die durch die doppelbrechenden Elemente des ersten Teilsystems eingeführte Polarisationsveränderung soll durch die doppelbrechenden Elemente des zweiten Teilsystems kompensiert werden, indem der Polarisationszustand des durch das optische System tretenden Lichtes mit dem Verzögerungselement um 90° gedreht wird. Dies kann insbesondere-

re bei zwei Teilsystemen, die eine gleichartige polarisationsverändernde Wirkung aufweisen, vorteilhaft sein. Zur Bestimmung der günstigsten Position zur Anbringung des Verzögerungselementes wird ein Verfahren angegeben, bei dem Jones-Matrizen zur Bestimmung der polarisationsverändernden Wirkung doppelbrechender Elemente bzw. Elementgruppen berechnet werden.

Bei einer Ausführungsform weist ein optisches System ein erstes Teilsystem mit einem ersten Stabintegrator als erstes doppelbrechendes Element und ein zweites Teilsystem mit einem zweiten Stabintegrator als zweites doppelbrechendes Element mit nahezu identischen Abmessungen auf. Durch ein zwischen beiden Stabintegratoren angebrachtes Verzögerungselement kann die polarisationsverändernde Wirkung der beiden Stabintegratoren im wesentlichen kompensiert werden.

15

In der EP 0 964 282 A1 wird eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem katadioptrischen Projektionsobjektiv beschrieben, das einen oder mehrere sphärische und planare Spiegel sowie mehrere refraktive optische Elemente aufweist. Die planaren Spiegel des Objekts weisen eine unterschiedliche Reflektivität für senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht auf, so dass bei Einstrahlung von unpolarisiertem Licht in das Projektionsobjektiv nach dem Durchgang des Lichts durch dasselbe in der Waferebene teilweise polarisiertes Licht vorliegt. Durch die Erzeugung einer geeignet angepassten, teilweise polarisierten Beleuchtungsstrahlung im dem Projektionsobjektiv vorgelagerten Beleuchtungssystem kann die polarisationsverändernde Wirkung der planaren Spiegel im wesentlichen kompensiert werden, so dass in der Waferebene im wesentlichen unpolarisiertes Licht vorliegt, was sich günstig auf die Qualität der Abbildung auswirken kann.

30

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Beleuchtungssystem der eingangs genannten Art bereitzustellen, das in Bezug auf Polarisations-

veränderungen, die durch winkelabhängig polarisationsverändernde optische Elemente im Beleuchtungssystem hervorgerufen werden, optimiert ist. Weiterhin soll ein Verfahren bereitgestellt werden, mit dem ein geeigneter Polarisationskompensator hergestellt werden kann.

5

Diese Aufgaben werden gelöst durch ein Beleuchtungssystem mit den Merkmalen von Anspruch 1, ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 10 sowie eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit den Merkmalen von Anspruch 14. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

10

Ein erfindungsgemäßes Beleuchtungssystem der eingangs genannten Art weist in mindestens einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems mindestens einen Polarisationskompensator auf, der mindestens eine Polarisationsveränderungseinrichtung zur ortsabhängigen Beeinflussung des Polarisationszustandes der Lichtverteilung in der Pupillenebene aufweist und der zur teilweisen oder vollständigen Kompensation von Polarisationsveränderungen durch winkelabhängig polarisationsverändernde optische Elemente im Beleuchtungssystem ausgelegt ist. Die Erfinder haben erkannt, dass eine winkelabhängige Polarisationsveränderung in einer Feldebene sich sehr effektiv durch eine ortsabhängige Beeinflussung des Polarisationszustandes mindestens teilweise kompensieren lässt, sofern diese in einer Pupillenebene oder in deren Nähe stattfindet. Wird daher in der Pupillenebene oder in deren Nähe eine ortsabhängige Polarisationsveränderungsfunktion vorgegeben, entsteht in einer auf diese folgenden Feldebene eine Polarisationsveränderungswirkung, die im wesentlichen vom Eintrittswinkel auf die Feldebene abhängt.

25

30

Bei einer Weiterbildung der Erfindung hat der Polarisationskompensator eine ortsabhängig variierende Polarisationsveränderungsfunktion, die in

Bezug auf eine optische Achse des Polarisationskompensators eine geradzählige Radialsymmetrie aufweist, insbesondere eine zweizählige oder vierzählige Radialsymmetrie. Winkelabhängige Polarisationsveränderungen können von optischen Elementen hervorgerufen werden, welche eine geradzählige Radialsymmetrie ihrer Polarisationsveränderungswirkung in Bezug auf die optische Achse des Beleuchtungssystems aufweisen. Hierzu gehören beispielsweise konische Axiconflächen, die mit linear polarisiertem Licht bestrahlt werden. Ein Polarisationskompensator, der in Umfangsrichtung seiner optischen Achse eine entsprechend angepasste variiierende Polarisationsverändernde Wirkung hat, kann die unerwünschten Wirkungen solcher Elemente besonders effektiv kompensieren.

Bei einer Ausführungsform weist das Beleuchtungssystem eine Integratorstabanordnung mit einer Lichteintrittsfläche und einer Lichtaustrittsfläche auf. Die Integratorstabanordnung hat einen polygonalen, insbesondere rechteckförmigen Querschnitt mit Stabseiten und Stabecken und dient der Homogenisierung des Beleuchtungslichts durch mehrfache innere Reflexionen an den Stabwänden. Sie kann aufgrund ihrer Funktionsweise und der Notwendigkeit, bei kleinen Lichtwellenlängen die Stabanordnung aus doppelbrechendem Material zu fertigen, eine polarisationsverändernde Wirkung auf das durch die Stabanordnung tretende Licht haben. Diese Polarisationsverändernde Wirkung hängt nach Untersuchungen der Erfinder wesentlich vom Winkel, aber nur unwesentlich vom dem Ort ab, unter dem das Beleuchtungslicht auf die Lichteintrittsfläche der Anordnung auftrifft. Die Polarisationsverändernde Wirkung der Integratorstabanordnung lässt sich daher in einem erfindungsgemäßen Beleuchtungssystem mit Hilfe eines geeignet angepassten Polarisationskompensators mindestens teilweise kompensieren.

Bei einer Weiterbildung der Erfindung weist der Polarisationskompensator eine der Anzahl der Stabecken entsprechende Anzahl an ersten

Sektoren mit einer ersten Polarisationsveränderungswirkung und einer der Anzahl der Stabseiten entsprechende, in Umfangsrichtung des Polarisationskompensators zwischen den ersten Sektoren liegenden zweiten Sektoren mit einer zweiten Polarisationsveränderungswirkung auf, wobei die erste und zweite Polarisationsveränderungswirkung unterschiedlich sind. Hierbei liegen die ersten Sektoren in den Stabecken zugeordneten Winkelabschnitten und die zweiten Sektoren in den Stabseiten zugeordneten Winkelabschnitten. Als Winkelabschnitte werden hier Bereiche in einer zu einer optischen Achse senkrechten Ebene bezeichnet, die jeweils innerhalb eines bestimmten Azimutalwinkelintervalls liegen. Die Polarisationsveränderungswirkung des Stabes ist für in die Stabecken oder die Stabseiten in diesen einfallenden Lichtstrahlen unterschiedlich. Die Symmetrie der Polarisationsveränderungswirkung des Polarisationskompensators stimmt mit der Symmetrie der Polarisationsveränderungswirkung des Stabes überein, so dass sich die Polarisationsveränderungswirkung der Integratorstabanordnung mit einem erfindungsgemäßen Beleuchtungssystem, welches einen dergestalt weitergebildeten Polarisationskompensator aufweist, mindestens teilweise kompensieren lässt.

In einer Ausführungsform weist das Beleuchtungssystem eine Einrichtung zur Erzeugung einer quadrupolförmigen Lichtverteilung in einer Pupillenebene auf. Eine solche Anordnung kann z.B. so aufgebaut sein wie in der EP 747 772 A beschrieben. Bereiche hoher Lichtintensität der quadrupolförmigen Lichtverteilung können hierbei in Winkelabschnitten lokalisiert sein, in denen auch die Stabecken lokalisiert sind. Eine winkelabhängige Polarisationskompensation ist hier besonders vorteilhaft, da bei einer solchen Lichtverteilung vor allem in die Stabecken gerichtete Lichtstrahlen auftreten. Eine Kompensation der Polarisationsveränderungswirkung der Integratorstabanordnung ist hierbei vorteilhaft dadurch möglich, dass der Polarisationskompensator in der Pupillenebene angebracht wird, in der die quadrupolförmige Lichtverteilung vorliegt.

Bei einer Weiterbildung der Erfindung ist der Polarisationskompensator in oder in der Nähe einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems, insbesondere im Lichtweg vor der Lichteintrittsfläche der Integratorstabsanordnung positioniert, in der auch ein diffraktives oder refraktives optisches Rasterelement angebracht ist. Das diffraktive oder refraktive optische Rasterelement kann zur Strahlformung dienen, so dass die Lichtverteilung auf die Form und Größe der Eintrittsfläche der Integratorstabanordnung angepasst werden kann. Findet die Polarisationskompensation in einer Pupillenebene vor dem Integratorstab statt, hat noch keine Lichtmischung durch den Stab stattgefunden, wodurch eine besonders wirkungsvolle Kompensation möglich ist.

In einer Ausführungsform weist das Beleuchtungssystem ein Abbildungsobjektiv zur Abbildung einer Feldebene, insbesondere der Lichteintrittsebene der Integratorstabanordnung, auf das Beleuchtungsfeld auf, wobei der Polarisationskompensator in oder in der Nähe einer Pupillenebene des Abbildungsobjektivs angebracht ist. Einen Polarisationskompensator in der Pupillenebene des Abbildungsobjektivs oder in deren Nähe anzubringen kann z.B. dann vorteilhaft sein, wenn in dieser keine anderen optischen Elemente positioniert werden.

Bei einer Weiterbildung der Erfindung weist der Polarisationskompensator als Polarisationsveränderungseinrichtung ein Rasterelement mit einer zweidimensionalen Anordnung von Elementen aus doppelbrechendem Material unterschiedlicher Dicke und/oder unterschiedlicher Kristallorientierung und/oder von Elementen mit unterschiedlichen doppelbrechenden Strukturen auf. Die Pupillenebene, in der die ortsabhängige Polarisationsveränderung mit dem Polarisationskompensator einstellbar ist, kann durch Verwendung eines Rasterelementes in Bereiche gleicher oder ähnlicher Polarisationsveränderungswirkung eingeteilt werden, denen jeweils ein Element der Rasteranordnung zugeordnet ist. Das Ras-

terelement ist vorteilhafter Weise derart ausgebildet, dass es die Pupillenebene flächendeckend ausfüllt. Durch die Festlegung der Kristallorientierung und Dicke eines doppelbrechenden Elements ist mit diesem eine zur Polarisationskompensation notwendige Polarisationsveränderungswirkung erzeugbar. Alternativ zur Verwendung von doppelbrechendem Material können auch unterschiedliche doppelbrechende Strukturen zur Polarisationsveränderung verwendet werden, beispielsweise Diffraktionsgitter mit einer Strukturbreite, die unterhalb der Wellenlänge des Lichts liegt, welches das Beleuchtungssystem durchstrahlt. Eine solche Gitter, bei dem die diffraktiven Strukturen in eine vorgegebene Richtung weisen, wirkt durch strukturinduzierte Doppelbrechung (form birefringence) wie ein doppelbrechendes Volumenmaterial.

In einer Ausführungsform umfasst der Polarisationskompensator als Polarisationsveränderungseinrichtung eine Platte, die ein Höhenprofil aus doppelbrechendem Material variabler Dicke aufweist. Mit dem Höhenprofil bzw. Dickenprofil lässt sich eine ortsabhängige Polarisationsveränderung erzeugen, die über den Bereich der Pupillenebene, in der die Platte positioniert ist, kontinuierlich oder in Stufen variiert. Ein Polarisationskompensator kann gegebenenfalls ein polarisationsveränderndes Rasterelement zusammen mit einer Platte mit Dickenprofil aufweisen, wodurch eine besonders vorteilhafte Polarisationsveränderungswirkung erzeugt werden kann.

Polarisationskompensatoren können serienmäßig mit bestimmten Ortsteilungen für die Polarisationsveränderungsfunktion hergestellt werden. Eine individuelle Anpassung an die in einem bestimmten Beleuchtungssystem vorliegenden Verhältnisse ist ebenfalls möglich. Ein hierfür geeignetes Verfahren der eingangs genannten Art umfasst folgende Schritte: Ermitteln einer durch mindestens ein winkelabhängig polarisationsveränderndes optisches Element hervorgerufenen winkelabhängigen Polarisationsveränderung innerhalb des Beleuchtungssystems. Berech-

nen einer ortsabhängig variierenden Polarisationsveränderung in einer Pupillenebene zur Kompensation der winkelabhängigen Polarisationsveränderung; Herstellen des Polarisationskompensators auf eine solche Weise, dass die ortsabhängige Polarisationsveränderung zur mindestens teilweisen Kompensation der winkelabhängigen Polarisationsveränderung geeignet ist. Anbringen des Polarisationskompensators in oder in der Nähe einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems, so dass die gewünschte Kompensationswirkung eintritt. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine kostengünstige und individuell angepasste Herstellung eines Polarisationskompensators.

Die Ermittlung der zu kompensierenden Polarisationsveränderung kann rein rechnerisch aufgrund von Simulationsrechnungen für einen bestimmten Systemaufbau durchgeführt werden. Die Ermittlung kann alternativ oder zusätzlich eine Messung der Polarisationsverhältnisse in einem Beleuchtungssystem umfassen.

Bei einer Weiterbildung des Verfahrens wird zum Berechnen der ortsabhängigen Polarisationsveränderung über alle Punkte einer Feldebene gemittelt, die in einer Fourier-Transformationsbeziehung zur Pupillenebene steht, die zur Anbringung des Polarisationskompensators vorgesehen ist. Durch die Mittelung über alle Punkte der Feldebene kann eine gegebenenfalls auftretende ortsabhängige Polarisationsveränderung in der Feldebene im Mittel kompensiert werden.

Die Erfindung betrifft auch eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, die mit einem erfindungsgemäßen Beleuchtungssystem ausgestattet ist. Bei einer Weiterbildung der Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage weist diese ein erfindungsgemäßes Beleuchtungssystem sowie ein Projektionsobjektiv mit einem physikalischen Strahlteiler mit polarisationsselektiver Strahlteilerfläche auf. An einem solchen Strahlteiler kann ein merklicher Lichtverlust auftreten, wenn die

Polarisation des Beleuchtungslichtes nicht optimal an den Strahlteiler angepasst ist. Daher kann sich eine Polarisationskompensation zum Einstellen eines vorgegebenen Polarisationszustandes auf dem Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems in diesem Fall besonders vorteilhaft auswirken.

Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei Ausführungsformen der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können.

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips der Polarisationskompensation;

Fig. 2 ist eine schematische Seitenansicht einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Beleuchtungssystems für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage;

Fig. 3 ist eine schematische Seitenansicht eines Teils des Beleuchtungssystems von Fig. 2;

Fig. 4 ist eine schematische Darstellung der zur Kompensation der von einem Integratorstab hervorgerufenen Polarisationsveränderung nötigen Polarisationsveränderungsfunktion des Polarisationskompensators zusammen mit einer Darstellung des Integratorstabs;

Fig. 5 ist eine schematische Draufsicht einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Polarisationskompensators;



Fig. 6 ist eine schematische Seitenansicht einer anderen Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Polarisationskompensators.

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips der Polarisationskompensation und zeigt ein ortsabhängig polarisationsveränderndes optisches System 1 mit einem vor diesem angeordneten Polarisationskompensator 2. Das Funktionsprinzip der Polarisationskompensation wird aufgrund der leichteren bildlichen Darstellung anhand einer ortsabhängigen Kompensation dargestellt, das Funktionsprinzip für eine winkelabhängige Polarisationskompensation ist hierzu äquivalent.

Ein erster und ein zweiter linear polarisierter Lichtstrahl 3a, 3b treffen an zwei unterschiedlichen Orten auf den Polarisationskompensator 2, wobei der erste Lichtstrahl 3a vom Polarisationskompensator in einen zirkular polarisierten Lichtstrahl umgewandelt wird und der zweite Lichtstrahl 3b in einen elliptisch polarisierten Lichtstrahl. Beide Strahlen 3a, 3b treten an unterschiedlichen Orten in das optische System 2 ein und erfahren durch dieses eine unterschiedliche Polarisationsveränderung. Beim Austritt aus dem optischen System 2 sind beide Strahlen 3a, 3b wie vor dem Eintritt in den Polarisationskompensator linear polarisiert. Die Polarisationsveränderung durch das optische System 2 wird somit gerade von der Polarisationsveränderung durch den Polarisationskompensator 1 aufgehoben, so dass das Gesamtsystem eine polarisationserhaltende Wirkung aufweist.

Fig. 2 ist eine schematische Seitenansicht einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Beleuchtungssystems, welches zusammen mit einem Projektionsobjektiv den wesentlichen Teil einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage bildet. Diese ist in diesem Fall ein Waferscanner zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen einsetzbar und arbeitet zur Erzielung von

Auflösungen bis zu Bruchteilen von Mikrometern mit Licht aus dem tiefen Ultraviolettbereich.

Als dem Beleuchtungssystem zugeordnete Lichtquelle 10 dient ein gebräuchlicher KrF-Excimer-Laser mit einer Betriebswellenlänge von 248 nm, mit der sehr kleine Strukturen aufgelöst werden können. Selbstverständlich können auch andere Lichtquellen, z.B. mit Wellenlängen von 193 nm oder 157 nm eingesetzt werden.

Das Laserlicht wird im Betrieb entlang der optischen Achse 19 in eine Spiegelanordnung 14 eingestrahlt, welche zur Kohärenzreduktion sowie zur Vergrößerung des Strahlquerschnitts dient und eine Lichtverteilung mit rechteckigem Querschnitt und mit im wesentlichen parallel zur optischen Achse verlaufenden Strahlen erzeugt. Auf die Spiegelanordnung 14 folgt ein erstes optisches Rasterelement 9, welches in der Objektebene eines nachfolgenden Objektivs 20 positioniert ist. Die Objektebene stellt eine Feldebene des Beleuchtungssystems dar. Bei dem Objektiv 20 handelt es sich um ein Zoom-Axicon-Objektiv mit einem Paar konischer Axiconenelemente 21 mit einander zugewandten konischen Axiconflächen und einer verstellbaren Zoom-Linse 22. Das Zoom-Axicon-Objektiv 20 vereinigt eine Zoom-Funktion zur stufenlosen Verstellung des Durchmessers einer durch dieses hindurchtretenden Lichtverteilung durch Verschieben der Zoom-Linse 22 mit einer Axicon-Funktion zur radialen Umverteilung von Lichtintensitäten durch axiales Verschieben der beiden Axiconenelemente 21 gegeneinander.

Die vom ersten optischen Rasterelement 9 eingeführte Lichtverteilung wird vom Objektiv 20 in eine Lichtverteilung auf dem zweiten optischen Rasterelement 8 überführt, welches mit geringem Abstand hinter dem letzten optischen Element des Objektivs 20 positioniert ist, und zwar im Bereich von dessen Austrittspupille, welche auch eine Pupillenebene 23 des Beleuchtungssystems darstellt.

Das zweite optische Rasterelement 8 erhöht den Lichtleitwert um ein Mehrfaches und wandelt die Verteilung der auf dieses einfallenden Strahlung in eine rechteckige Lichtverteilung um, deren Aspektverhältnis so gewählt ist, dass diese nach Übertragung auf die Eintrittsfläche 5a eines Integratorstabes 5 mittels einer Einkoppeloptik 4 diese genau überdeckt.

In der Pupillenebene 23, in der das optische Rasterelement 8 positioniert ist, befindet sich im Lichtweg unmittelbar vor diesem ein Polarisationskompensator 11, welcher die Pupillenebene 23 vollständig ausfüllt. Dessen Aufbau und Funktionsweise werden weiter unten näher beschrieben.

15 Die Austrittsfläche 5b des Integratorstabs 5, welche eine Fellebene des Beleuchtungssystems darstellt, wird durch ein nachfolgendes Abbildungsobjektiv 6, welches Linsengruppen 61, 63 und 65, eine Pupillenebene 62 sowie einen Umlenkspiegel 64 aufweist, auf das Beleuchtungsfeld 7 des Beleuchtungssystems abgebildet. Eine variables Maskierungssystem (REMA) 51 ist in unmittelbarer Nähe der Austrittsfläche 5b des Integratorstabs 5 angeordnet.

25 Dem Beleuchtungssystem nachgeordnet ist ein nicht bildlich dargestelltes Projektionsobjektiv, in dessen Objektebene das Beleuchtungsfeld 7 positioniert ist. Bei dem Projektionsobjektiv kann es sich um ein katadioptrisches Objektiv mit einem physikalischen Strahlteiler mit polarisationsselektiver Strahlteilerfläche handeln. Um den Lichtverlust an der Strahlteilerfläche möglichst gering zu halten, kann eine genaue Einstellung des Polarisationszustandes auf dem Beleuchtungsfeld 7 angezeigt 30 sein.

Fig. 3 ist eine schematische Seitenansicht eines Teils des Beleuchtungssystems von Fig. 2. Sie zeigt das in einer Fellebene des Beleuchtungssystems positionierte erste optische Rasterelement 9, das vereinfachend durch eine Linse dargestellte Objektiv 20, den in einer Pupillenebene 23 gemeinsam mit dem zweiten optischen Rasterelement 8 angebrachten Polarisationskompensator 11, die vereinfachend durch eine Linse dargestellte Einkoppeloptik 4 sowie die Leiteintrittsfläche der Integratorstabanordnung 5a. Mit dem ersten optischen Rasterelement 9 und dem Objektiv 20 lässt sich in der Pupillenebene 23 eine quadrupolförmige Lichtverteilung erzeugen.

15 Zwischen der Pupillenebene 23, in welcher der Polarisationskompensator 11 positioniert ist, und der Eintrittsfläche 5a des Integratorstabs 5 besteht eine Fourier-Transformationsbeziehung. Daher können winkelabhängige Polarisationsveränderungen, welche vom Eintrittswinkel des Beleuchtungslichts in die Eintrittsfläche 5a abhängen, durch ortsabhängige Polarisationsveränderungen im Bereich der Pupillenebene 23 mit Hilfe des Polarisationskompensators 11 ausgeglichen werden.

20 Um Polarisationsveränderungen im Mittel auszugleichen, die vom Eintrittsort des Beleuchtungslichts auf die Eintrittsfläche 5a des Integratorstabs 5 abhängen, wird für jeden Einfallswinkel, d.h. für jeden Punkt der Pupillenebene 23 eine mittlere Polarisationsveränderung errechnet, indem über alle Orte der Eintrittsfläche 5a gemittelt wird. Da das zweite optische Rasterelement 8 die deterministische Strahlausbreitung zerstört und dadurch die Winkelverteilung in der Stabeintrittsfläche 5a verschmiert, wenn auch in einem kleinen Winkelbereich, wird zur Bestimmung der ortsabhängigen Polarisationsveränderung auch über diese vom zweiten Rasterelement 8 eingeführte, verschmierte Winkelverteilung 30 gemittelt.

Figur 4 ist eine schematische Darstellung der zur Kompensation der von einem Integratorstab 5 hervorgerufenen Polarisationsveränderung benötigten Polarisationsveränderungsfunktion des Polarisationskompensators 11 zusammen mit einer Darstellung des Integratorstabes 5. Der Polarisationskompensator 11 weist eine der Anzahl der Stabecken 16 entsprechende Anzahl von vier ersten Sektoren 12 mit einer ersten Polarisationsveränderungswirkung auf. In Umfangsrichtung des Polarisationskompensators zwischen den ersten Sektoren 12 liegen eine Anzahl der Stabseiten 17 entsprechende Anzahl von vier zweiten Sektoren 13 mit einer zweiten Polarisationsveränderungswirkung. Die ersten Sektoren 12 liegen hierbei in den Stabecken 16 zugeordneten Winkelabschnitten, die zweiten Sektoren 13 in den Stabseiten 17 zugeordneten Winkelabschnitten. Die den ersten Sektoren 12 und den zweiten Sektoren 13 entsprechenden Winkelabschnitte sind zur Verdeutlichung auch als erste und zweite Bereiche 14, 15 auf der Eintrittsfläche des Integratorstabes 5 gezeigt. Zwischen den Bereichen findet im realen System ein allmählicher Übergang statt. Der Integratorstab hat einen Rechteck-Querschnitt mit einer Breite in x-Richtung, die größer ist als die Höhe in y-Richtung, welche der Scanrichtung des Waferscanners entspricht. Bezogen auf die optische Achse 19 liegt somit eine zweizählige Radialsymmetrie vor.

Der Integratorstab 5 mischt und homogenisiert das durch diesen hindurchtretende Licht durch mehrfache innere Reflexion an den Seitenflächen. Er ist aus doppelbrechendem  $\text{CaF}_2$  hergestellt, welches eine polarisationsverändernde Wirkung auf das durch den Stab hindurchtretende Licht aufweist. Zusätzlich wird bei realen, nicht ideal glatten Seitenflächen bei jeder Totalreflexion an einer Seitenfläche des Integratorstabes eine erste, senkrecht zur Einfallsebene einfallende Polarisationskomponente des durch den Stab tretenden Lichts stärker reflektiert als eine zweite, parallel zur Einfallsebene einfallende Komponente und es treten Phasensprünge auf. Somit verändert sich bei jeder Totalreflexion der Polarisationszustand des Lichts. Die Zahl der Totalreflexionen, die ein

Lichtstrahl im Stab erfährt, hängt vom Einfallswinkel, der Stabgeometrie und der Stablänge ab. Die Stabgeometrie bzw. die Symmetrie des Stabes beeinflusst die Länge des Lichtwegs, der zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reflexionen zurückgelegt wird und hat somit direkte Auswirkungen auf die Polarisationsveränderungswirkung des Stabes.

Die Symmetrie der Polarisationsveränderungsfunktion des Polarisationskompensators 11 wird an die polarisationsverändernde Wirkung des Integratorstabes 5 angepasst. Die ersten Sektoren 12 weisen hierbei für gewöhnlich eine stärkere Polarisationsveränderungswirkung auf als die zweiten Sektoren 13, da Strahlen, die Winkelabschnitten der Stabecken 16 des Integratorstabes 5 zugeordnet sind, durch diesen eine stärkere polarisationsverändernde Wirkung erfahren als Strahlen, die den Winkelabschnitten der Stabseiten 17 zugeordnet sind. Die ersten Sektoren 13 sind aufgrund der stärkeren polarisationsverändernden Wirkung daher in der Figur mit einem Plus-Symbol versehen. Wird eine quadrupolförmige Lichtverteilung in oder in der Nähe der Pupillenebene 23 eingestellt, so dass Bereiche großer Lichtintensität 31 dieser Verteilung teilweise in den ersten Sektoren 13 liegen, wird diese durch den Integratorstab 5 besonders stark polarisationsverändernd beeinflusst, so dass in diesem Fall eine besonders starke Polarisationskompensation nötig ist.

Der zur winkelabhängigen Polarisationskompensation verwendete Polarisationskompensator 11 kann zusammen mit einer ortsabhängig polarisationskompensierenden Vorrichtung eingesetzt werden. Insbesondere ist dies mit einem eine Verzögerung um  $\lambda/2$  einführenden Verzögerungselement wie in der DE 102 11 762 beschrieben möglich, deren Offenbarungsgehalt durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gegeben macht wird. Dieses Verzögerungselement kann insbesondere als eine zwischen einem ersten und zweiten Teil der Integratorstabanordnung angebrachte  $\lambda/2$ -Platte ausgeführt sein.

Fig. 5 ist eine schematische Draufsicht auf eine Ausführungsform des Polarisationskompensators. Der Polarisationskompensator 11a weist hierbei eine Anordnung von sechseckigen, wabenförmigen Elementen 18 aus doppelbrechendem Material, in diesem Beispiel aus  $\text{CaF}_2$ , auf, welche flächenfüllend nebeneinander angeordnet sind. Die in der Figur durch Pfeile repräsentierte Orientierung der kristallographischen Hauptachsen der Elemente 18 kann hierbei so gewählt werden, dass sich zusammen mit einer geeigneten Variation der Dicke der Elemente 18 eine beliebige Polarisationsveränderung mit einer Ortsauflösung, die der Größe der Elemente entspricht, einstellen lässt. Für Details zur Herstellung von rasterförmigen Anordnungen sei auf die DE 101 24 803 A1 verwiesen, deren Offenbarungsgehalt durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird.

Fig.6 ist eine schematische Seitenansicht einer anderen Ausführungsform eines Polarisationskompensators. Der Polarisationskompensator ist hier als einstückige Platte 11b mit einem Höhenprofil 30 ausgeführt. Ein derartiges Profil 30 lässt sich mit herkömmlichen Verfahren zur Strukturierung von Oberflächen herstellen und ermöglicht eine Variation der Polarisationsveränderung mit hoher Raumfrequenz. Eine solche Platte aus einem doppelbrechenden Material, z.B. Magnesiumfluorid oder Quarz, lässt sich auch als Teil eines Polarisationskompensators 11 verwenden, welcher als Polarisationsveränderungseinrichtung sowohl die Rasteranordnung 11a als auch die Platte 11b aufweisen kann. Hierzu kann die Platte mit der Rasteranordnung verbunden werden, beispielsweise indem diese an die Rasteranordnung angesprengt wird. Durch Verwendung der Platte 11b kann in diesem Fall eine zusätzliche Feinabstimmung der Polarisationsveränderung erreicht werden.

Alternativ zu den in Fig. 5 und Fig. 6 gezeigten Ausführungsformen des Polarisationskompensators sind selbstverständlich auch andere Ausfüh-

rungsformen denkbar, beispielsweise indem eine Platte aus strukturdoppelbrechendem Material, dessen doppelbrechende Eigenschaften ortsabhängig variiert werden, zur Herstellung des Polarisationskompensators verwendet wird. Auch kann alternativ zur in Fig. 2 gezeigten Positionierung des Polarisationskompensators in der Pupillenebene 23, in der das zweite optische Rasterelement 8 angebracht ist, dieser auch in der Pupillenebene 62 des Abbildungsobjektivs angeordnet sein.

Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines Polarisationskompensators wird zunächst die durch ein winkelabhängig polarisationsveränderndes optisches Element hervorgerufene winkelabhängige Polarisationsveränderung bestimmt. Dies kann durch Simulationsrechnungen oder durch geeignete Messverfahren geschehen. Aus der winkelabhängigen Polarisationsveränderung wird eine ortsabhängige Polarisationsveränderungsfunktion errechnet, die in einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems eingestellt werden sollte, um die winkelabhängige Polarisationsveränderung mindestens teilweise zu kompensieren. Der Polarisationskompensator wird nun auf eine solche Weise hergestellt, dass mit diesem die errechnete Polarisationsveränderungsfunktion möglichst genau nachgebildet werden kann. Zum Abschluss des Verfahrens wird der Polarisationskompensator in einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems angebracht, so dass die gewünschte Kompensationswirkung eintritt.

25

-----

### Patentansprüche

1. Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes (7) mit dem Licht einer zugeordneten Lichtquelle (10), bei dem in mindestens einer Pupillenebene (23, 62) des Beleuchtungssystems mindestens ein Polarisationskompensator (11) angebracht ist, der mindestens eine Polarisationsveränderungseinrichtung (11a; 11b) zur ortsabhängigen Beeinflussung des Polarisationszustandes der Lichtverteilung in der Pupillenebene (23, 62) aufweist und der zur teilweisen oder vollständigen Kompensation von Polarisationsveränderungen durch winklabhängig polarisationsverändernde optische Elemente (5) des Beleuchtungssystems ausgelegt ist.
2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, bei dem der Polarisationskompensator (11) eine ortsabhängig variierende Polarisationsveränderungsfunktion hat, die in Bezug auf eine optische Achse (19) des Polarisationskompensators (11) eine geradzählige Radialsymmetrie aufweist, insbesondere eine zweizählige oder vierzählige Radialsymmetrie.
3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 oder 2, bei dem das Beleuchtungssystem eine Integratorstabanordnung (5) mit einer Lichteintrittsfläche (5a) und einer Lichtaustrittsfläche (5b) aufweist und die Integratorstabanordnung (5) einen polygonalen, insbesondere rechteckförmigen Querschnitt mit Stabseiten (17) und Stabecken (16) hat.
4. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, bei dem der Polarisationskompensator (11) eine der Anzahl der Stabecken (16) entsprechende Anzahl von ersten Sektoren (12) mit einer ersten Polarisationsveränderungswirkung und eine der Anzahl der Stabseiten (17) entsprechende, in Umfangsrichtung des Polarisationskompensators (11)

zwischen den ersten Sektoren (12) liegenden zweiten Sektoren (13) mit einer zweiten Polarisationsveränderungswirkung aufweist, wobei die ersten Sektoren (12) in den Stabecken (16) zugeordneten Winkelabschnitten und die zweiten Sektoren (13) in den Stabseiten zugeordneten Winkelabschnitten (17) liegen und die erste und zweite Polarisationsveränderungswirkung unterschiedlich sind.

5. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 3 oder 4, bei dem das Beleuchtungssystem eine Einrichtung (9, 20) zur Erzeugung einer quadrupolförmigen Lichtverteilung in einer Pupillenebene (23) aufweist, die derart einstellbar ist, dass Bereiche hoher Lichtintensität der quadrupolförmigen Lichtverteilung in Winkelabschnitten lokalisiert sind, in denen auch die Stabecken (16) lokalisiert sind.
6. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in oder in der Nähe einer Pupillenebene (23) des Beleuchtungssystems, insbesondere im Lichtweg vor der Lichteintrittsfläche (5a) der Integratorstabanordnung, ein diffraktives oder refraktives optisches Rasterelement (8) mit zweidimensionaler Rasterstruktur angebracht ist und der Polarisationskompensator (11) in oder in der Nähe der Pupillenebene (23) positioniert ist.
7. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Beleuchtungssystem ein Abbildungsobjektiv (6) zur Abbildung einer Feldebene, insbesondere der Lichtaustrittsebene (5b) der Integratorstabanordnung (5), auf das Beleuchtungsfeld (7) aufweist und der Polarisationskompensator (11) in oder in der Nähe einer Pupillenebene (62) des Abbildungsobjektivs (6) angebracht ist.
8. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Polarisationskompensator (11) als Polarisationsveränderungseinrichtung ein Rasterelement (11a) mit einer zweidimensionalen

len Anordnung von Elementen (18) aus doppelbrechendem Material unterschiedlicher Dicke und/oder unterschiedlicher Kristallorientierung und/oder von Elementen mit unterschiedlichen doppelbrechenden Strukturen aufweist.

9. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Polarisationskompensator (11) als Polarisationsveränderungseinrichtung eine Platte (11b) umfasst, die ein Höhenprofil (30) aus doppelbrechendem Material variabler Dicke aufweist.

10. Verfahren zur Herstellung eines Polarisationskompensators (11) zum Einbringen in ein Beleuchtungssystem mit folgenden Schritten:  
Ermitteln einer durch mindestens ein winklabhängig polarisationsveränderndes optisches Element (5) hervorgerufenen winklabhängigen Polarisationsveränderung innerhalb des Beleuchtungssystems;  
Berechnen einer ortsabhängig variierenden Polarisationsveränderung in einer Pupillenebene (23, 62) zur Kompensation der winklabhängigen Polarisationsveränderung;  
Herstellen des Polarisationskompensators (11) auf eine solche Weise, dass die ortsabhängige Polarisationsveränderung zur mindestens teilweisen Kompensation der winklabhängigen Polarisationsveränderung geeignet ist;  
Anbringen des Polarisationskompensators (11) in oder in der Nähe einer Pupillenebene (23, 62) des Beleuchtungssystems, so dass die gewünschte Kompensationswirkung eintritt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem der Polarisationskompensator (11) als ein Rasterelement (11a) mit einer zweidimensionalen Anordnung von Elementen (18) aus doppelbrechendem Material oder Elementen mit unterschiedlichen doppelbrechenden Strukturen hergestellt wird, deren Dicke und/oder Kristallachsenorientierung ortsabhängig so vorgegeben wird, dass die ortsabhängige Polarisationsver-

änderung zur Kompensation der winklabhängigen Polarisationsveränderung geeignet ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 oder 11, bei dem das Beleuchtungssystem eine Integratorstabanordnung (5) mit einer Lichteintrittsfläche (5a) und einer Lichtaustrittsfläche (5b) aufweist und die Integratorstabanordnung (5) einen polygonalen Querschnitt mit Stabseiten (17) und Stabecken (16) hat und bei dem der Polarisationskompensator (11) eine der Anzahl der Stabecken (16) entsprechende Anzahl von ersten Sektoren (12) mit einer ersten Polarisationsveränderungswirkung und eine der Anzahl der Stabseiten entsprechende, in Umfangsrichtung des Polarisationskompensators zwischen den ersten Sektoren (12) liegenden zweiten Sektoren (13) mit einer zweiten Polarisationsveränderungswirkung aufweist, wobei die ersten Sektoren (12) in den Stabecken (16) zugeordneten Winkelabschnitten und die zweiten Sektoren (13) in den Stabseiten zugeordneten Winkelabschnitten (17) liegen und die erste und zweite Polarisationsveränderungswirkung unterschiedlich ist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, bei dem zum Berechnen der ortsabhängigen Polarisationsveränderung über alle Punkte einer Feldebene (5a) gemittelt wird, die in einer Fourier-Transformationsbeziehung zur Pupillenebene (23, 62) steht, die zur Anbringung des Polarisationskompensators (11) vorgesehen ist.

14. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv, bei der das Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9 ausgebildet ist.

15. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 14, bei der das Projektionsobjektiv einen physikalischen Strahlteiler mit polarisationsselektiver Strahlteilerfläche umfasst.

Zusammenfassung

Ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes (7) mit dem Licht einer zugeordneten Lichtquelle (10) hat mindestens einen Polarisationskompensator (11) in einer Pupillenebene (23) des Beleuchtungssystems. Mit diesem kann eine von winkelabhängig polarisationsverändernden Elementen (5) eingeführte Polarisationsveränderung mindestens teilweise kompensiert werden. Der Polarisationskompensator (11) weist zur ortsabhängigen Polarisationsveränderung Polarisationsveränderungsmittel auf, die als doppelbrechende Elemente oder Elemente mit einer doppelbrechenden Struktur ausgebildet sein können. Durch eine solche Polarisationskompensation können insbesondere bei Verwendung eines nachfolgenden Projektionsobjektivs mit physikalischem Strahlteiler die Transmissionseigenschaften der Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gesteigert werden.

(Hierzu Fig. 2)

-----

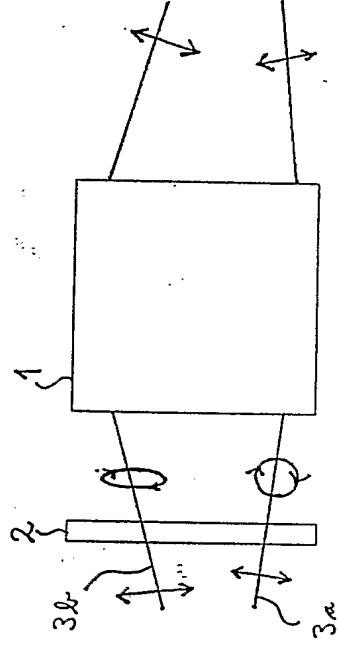


Fig. 1

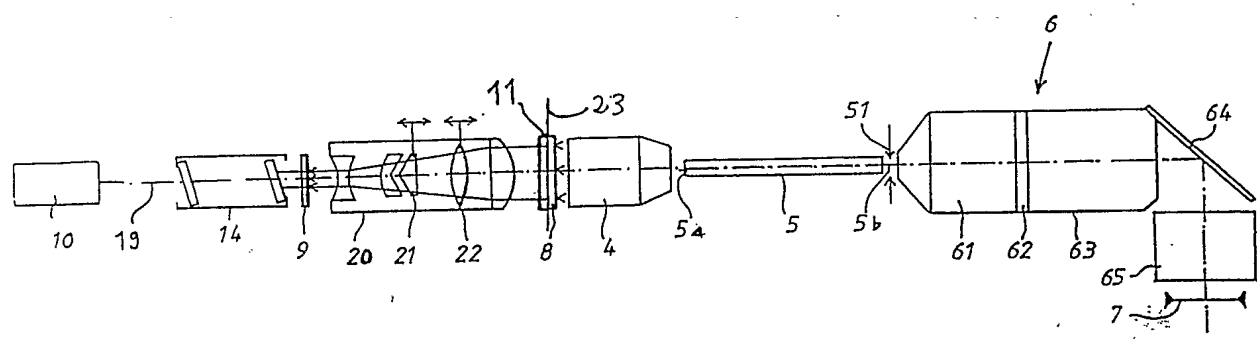


Fig. 2

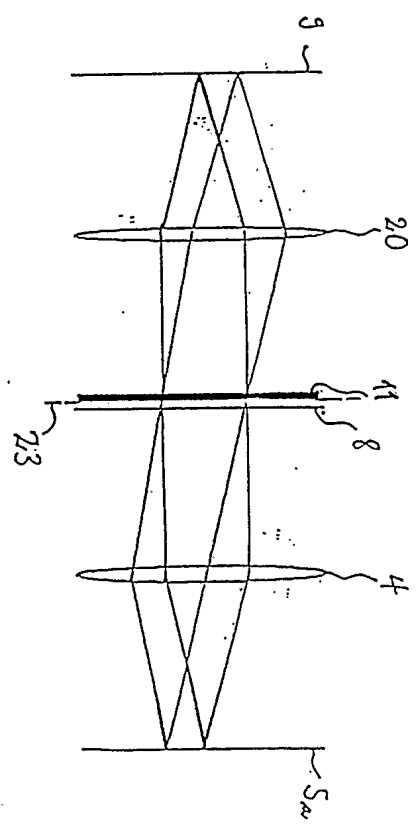


Fig. 3

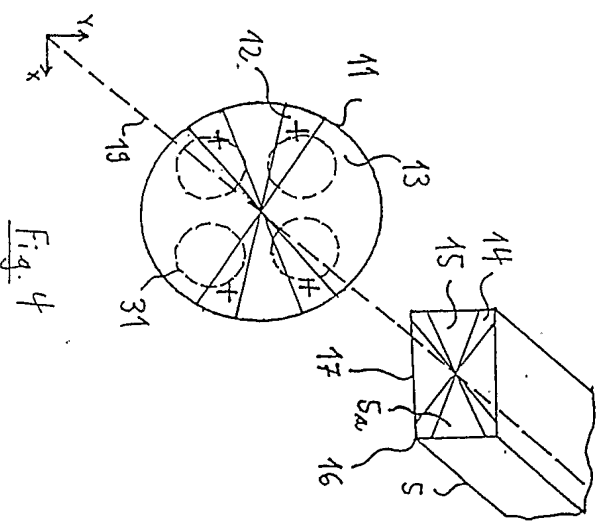


Fig. 4



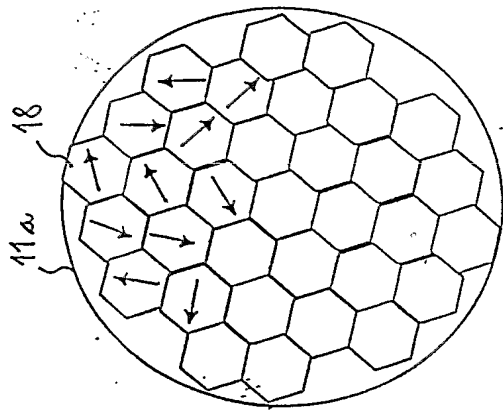


Fig. 5

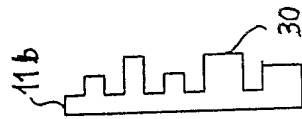


Fig. 6